

MODELADO MATEMATICO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AIRE SOBRE LA VELOCIDAD DE SECADO DE PASTAS LIBRES DE GLUTEN

Larrosa, Virginia J.^{1,2}; Lorenzo, Gabriel^{1,3}; Zaritzky, Noemí. E.^{1,3}; Califano, Alicia N.¹

¹CIDCA, CONICET, Fac. Cs. Exactas, UNLP, 47 y 116, La Plata (1900), Argentina. ²Fac. de Bromatología UNER. ³Dep. Ing. Química, Fac. Ingeniería, UNLP
e-mail: zaritzky@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: Pastas libres de gluten, secado, modelado matemático, transferencia de materia.

Introducción

El proceso desecado de las pastas supone un sistema compuesto por dos fases: el aire de secado y la masa. El equilibrio termodinámico se asume en la interfase de acuerdo con la isoterma de sorción, y la eliminación de agua se rige por un transporte simultáneo de masa y calor. La velocidad de secado depende de las características del equipo donde se realiza el proceso (temperatura de bulbo seco, humedad relativa (HR), velocidad del aire, etc.) y de las características del producto (contenido de agua, relación volumen/superficie, etc.).

La enfermedad celíaca consiste en una intolerancia irreversible a la fracción gliadina de las proteínas de trigo, y a las prolaminas de centeno, cebada y avena. El único tratamiento efectivo que tienen los pacientes es ajustarse a una dieta libre de gluten durante toda su vida. En particular, el secado de pastas aptas para celíacos es muy importante debido a la ausencia de la red proteica que forma el gluten en las pastas tradicionales y contiene a los gránulos de almidón dentro de la matriz. Un control inadecuado de la velocidad de secado puede conducir a pastas frágiles que se desintegran durante el proceso de cocción.

El presente trabajo tiene como objetivo modelar numéricamente el proceso de transferencia simultánea de energía y materia durante el secado de pastas libres de gluten aptas para celíacos, estudiando el efecto de variables de proceso como la temperatura y humedad del aire de secado.

Parte experimental

Ensayos de secado: La determinación de las curvas de secado en pastas libres de gluten se realizó sobre una formulación previamente optimizada (Larrosa et al., 2013) conteniendo: almidón (41.1%) y harina de maíz (10.3%), proteínas de huevo en polvo (6.6%), mezclas de hidrocoloides (xántica/garrofin, 2.5%), agua (35.8%), aceite (2.6%) y NaCl (1.1%). Las pastas presentaron una geometría tipo cintas con dimensiones medias de 20cm x 8cm x 2mm. El proceso se realizó en una estufa de aire forzado a velocidad constante, diseñada y construida "ad hoc", con sistemas independientes de control de humedad relativa del aire y de temperatura que permite medir la pérdida de peso "in situ" de manera continua. Se ensayaron cuatro condiciones de proceso diferentes: dos temperaturas (30°C y 50°C) y dos humedades relativas (40 y 80%) manteniendo constante la velocidad del aire en 0.5 m/s. Antes de comenzar el ensayo, el equipo era colocado en funcionamiento un día antes con el objetivo de estabilizar la temperatura y humedad relativa a la cual sería secado el producto.

Isotermas de sorción: Las isotermas de sorción de las pastas LG se realizaron a dos temperaturas 25°C y 40°C, utilizando la técnica gravimétrica por el método estático, para lo cual se usaron soluciones salinas saturadas de actividad de agua cubriendo un rango

de actividad de agua (a_w) entre 0.20 y 0.92. Diferentes recipientes conteniendo la muestra y la sal saturada fueron cerrados herméticamente y colocados en una estufa de temperatura controlada. Se controló el peso de las muestras cada 7 días, hasta llegar a peso constante (condición de equilibrio). El ensayo se realizó por duplicado para cada temperatura.

El contenido de humedad de equilibrio de las muestras se determinó, siguiendo el método 44-40 AACC (1984); la actividad de agua de cada muestra y de las sales saturadas fue controlada usando un equipo AquaLab Series 3 (Pullman, Estados Unidos).

Modelado de las isotermas: A partir de los datos experimentales previamente obtenidos en condiciones de equilibrio correspondientes al contenido de humedad de la muestra y la humedad relativa de equilibrio del aire de secado (actividad acuosa, a_w) se determinó la influencia de la temperatura en el equilibrio higroscópico empleando el modelo de Oswin modificado por Chen y Morey (1989), que tiene en cuenta la influencia de la temperatura sobre la sorción de vapor de agua por los alimentos (ec. 1).

$$X_w = (A + BT) \left(\frac{a_w}{1 + a_w} \right)^C \quad (1)$$

donde:

a_w : actividad acuosa (g de agua/g de aire)

X_w : humedad de equilibrio (g de agua/g masa seca)

A, B y C son los parámetros del modelo y T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Modelado de las curvas de secado: El secado implica una transferencia simultánea de calor y masa. Es una operación básica donde intervienen dos factores importantes, como es la transmisión de calor, para suministrar el calor latente de evaporación del agua y la transferencia de agua que implica su movimiento a través de los productos alimenticios y su separación de los mismos. Además existen factores muy importantes que intervienen en la velocidad de secado de alimentos como son el tamaño y la geometría del producto a secar.

El proceso de secado presenta generalmente un breve período de velocidad constante y posteriormente se produce un período de velocidad decreciente, donde el factor que controla es la difusión.

Asumiendo para la etapa difusional de transporte de humedad a través de la pasta, un modelo basado en la segunda ley de Fick en estado no estacionario resulta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (2)$$

donde C es la concentración de agua en el sólido (mol de agua/ m^3 de masa) y D el coeficiente de difusión efectivo (m^2/s).

La transferencia de energía en el sistema está dada por:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

donde ρ , C_p y k son la densidad, calor específico y conductividad térmica del sólido, respectivamente.

Las condiciones de contorno que acoplan los balances de materia y energía son:

$$h(T_{\infty} - T_s) + \lambda \cdot N_s = -n \cdot (-k \nabla T) \quad (4)$$

$$N_s = -n \cdot (\rho D \nabla C) = k_m (C'_i - C'_b) = \frac{k_m}{m} (C_i - C_b) \quad (5)$$

donde h es el coeficiente de transferencia calórica ($W/m^2\text{ }^{\circ}\text{C}$), T_{∞} es la temperatura del aire de secado, T_s la temperatura en la interfase del sólido, λ el calor latente de evaporación del agua, N_s es el flujo de agua evaporada, k_m es el coeficiente de transferencia de materia, m es la pendiente de la curva de equilibrio (isoterma de sorción), C'_i y C'_b son las concentraciones de agua en la interfase y en el seno del aire, respectivamente evaluadas por unidad de volumen de fase gaseosa, y C_i y C_b las mismas concentraciones evaluadas por volumen de sólido.

Se utilizó el método de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales a través del software Comsol Multiphysics. Para las simulaciones se consideró un sistema bidimensional y se alimentaron las propiedades físicas del sólido y del fluido calefactor para cada condición de proceso (De Temmerman y col., 2007; Migliori y col., 2005; Veladat y col., 2012).

Resultados y discusión

Isotermas de sorción: En la Figura 1 se muestra el ajuste satisfactorio realizado ($R^2=0.84$) con la ec. (1) sobre los datos experimentales de isotermas de sorción. A partir de los parámetros del modelo ($A=0.202$ $B=-2.62 \times 10^{-3}$, y $C=0.474$) se predijeron las humedades de equilibrio en las distintas condiciones de secado.

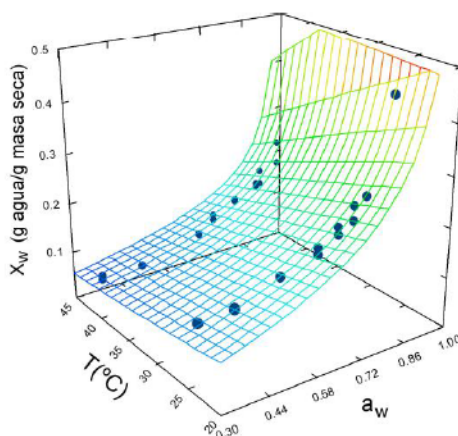


Figura 1. Modelado de las humedades de equilibrio (X_w) en función de la actividad de agua (a_w) y la temperatura.

Además se derivó la Ec.1 para obtener la pendiente de la curva de equilibrio (m) para cada condición de proceso (humedad y temperatura).

Curvas de secado: Las curvas experimentales (Figura 2) muestran la disminución de la humedad de los fideos desde su contenido inicial promedio de 0.65 g de agua/g b.s. hasta el valor deseado de 0.13 g de agua/g b.s. En todas las curvas se puede observar que inicialmente, y por un breve período, el contenido de agua disminuyó linealmente, y luego comenzó a disminuir más lentamente, entrando en el período de velocidad decreciente.

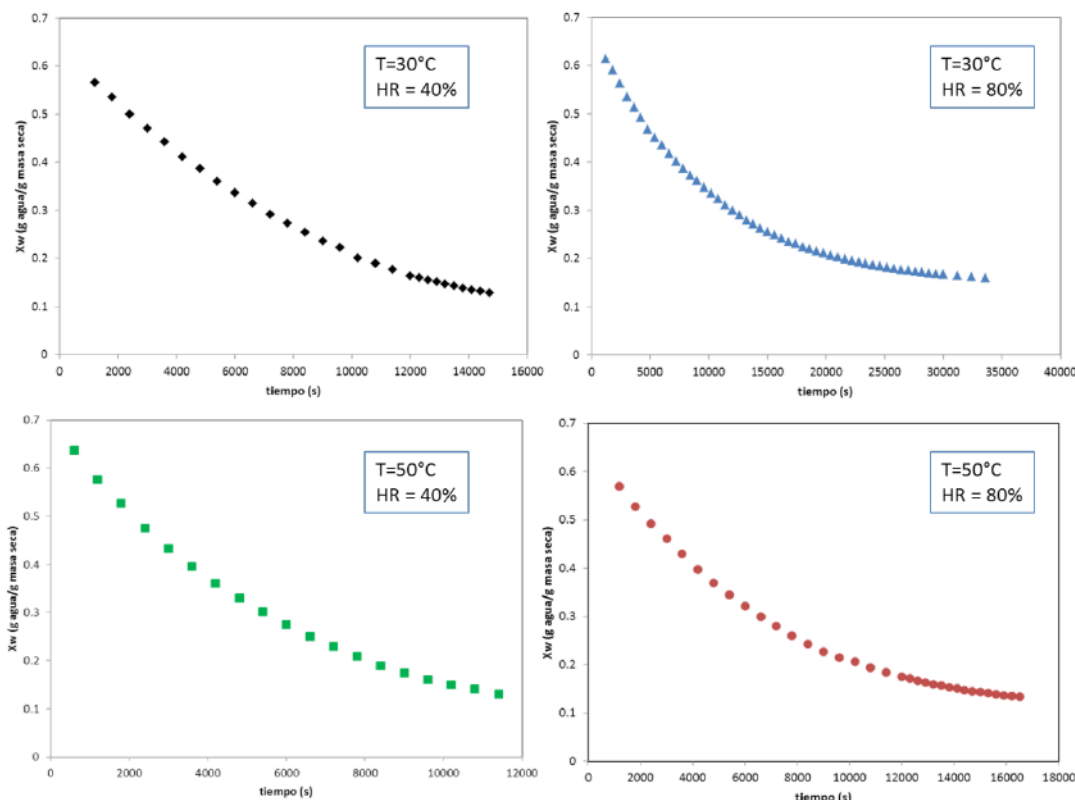


Figura 2. Curvas de secado experimentales para las distintas condiciones de Temperatura y humedad relativa(HR) del aire de secado.

Cálculo de las propiedades termofísicas y coeficientes de transferencia:

- Propiedades termofísicas de la pasta:

Para el cálculo del calor específico (C_p) del sólido se utilizó el promedio pesado de los C_p de sus componentes mediante sus fracciones másicas, w_i (Migliori y col., 2005):

$$C_p = \left[\frac{X}{1+X} C_{p,agua} + \frac{1}{1+X} C_{p,sol} \right] \quad (6)$$

$$C_{p,sol} = w_{almidón} C_{p,almidón} + w_{proteína} C_{p,proteína} + w_{grasa} C_{p,grasa} \quad (7)$$

$$C_{p,almidón} = 5.737(T) + 1328 \quad [J/(kg \ K)] \quad (8)$$

$$C_{p,proteína} = 6.329(T) + 1465 \quad [J/(kg \ K)] \quad (9)$$

$$C_{p,grasa} = 2000 \quad [J/(kg \ K)] \quad (10)$$

Para la conductividad térmica de la pasta se adoptó el modelo propuesto por Saravacos y Maroulis (2001):

$$k(X, T) = \frac{\lambda_0}{1+X} \exp \left[-\frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] + \frac{X\lambda_i}{1+X} \exp \left[-\frac{E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (11)$$

donde R es la constante de gases ideales, λ_0 (0.273 W/mK) y λ_i (0.8 W/mK) son las conductividades térmicas a $T_{ref}=60^\circ\text{C}$ y humedades $X=0$ y $X=\infty$, respectivamente; E_0 y E_i son las energías de activación para conducción de calor para $X=0$ y $X=\infty$, respectivamente.

La densidad del sólido se determinó experimentalmente determinando el peso y volumen de diferentes muestras de pasta.

El coeficiente de difusión del agua en la pasta se ajustó utilizando los datos experimentales y se validó a través de experimentos independientes.

- Coeficientes de transferencia de energía y materia :

El coeficiente de transferencia de energía se calculó mediante correlaciones del tipo $Nu=f(Re, Pr)$ para flujo alrededor de objetos sumergidos, placa plana y en régimen laminar $Re < 3 \times 10^5$ (Geankoplis, 2003).

$$Nu = 0.648 Re^{0.5} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

donde $Nu = \frac{hL}{k}$, $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$ y $Pr = \frac{C_p \mu}{k}$ son los números de Nusselt, Reynolds y Prandtl, respectivamente, determinados a partir de las propiedades físicas del aire en cada condición de proceso específica; L es la longitud característica (se adoptó $L=8.07$ mm para este caso).

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de materia k_m se utilizó la analogía entre transferencia de energía y materia (De Temmerman y col., 2007):

$$\frac{h}{k_m} = \rho C_p \left(\frac{\alpha}{D_{agua}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

donde α es la difusividad térmica del aire y D_{agua} es el coeficiente de difusión de agua en aire a cada temperatura.

Resultados del modelo: En la Figura 3a se muestra, a modo de ejemplo, el satisfactorio ajuste del modelo a los datos experimentales correspondientes a pastas libres de gluten, para un secado a 50°C y humedad relativa del aire de 80%. Las diferentes condiciones operativas presentaron un comportamiento análogo con un error porcentual promedio en el ajuste inferior al 5%.

El uso de soluciones analíticas más simples aborda el problema considerando únicamente la ley de Fick, sin acoplar el proceso de transferencia de energía y la evaporación que ocurre en la superficie de la pasta. Además, se considera que el secado se realiza en condiciones isotérmicas, en las cuales el sólido alcanza instantáneamente la temperatura del aire, sin tener en cuenta la existencia del coeficiente h . Sin embargo, puede observarse a partir del modelo numérico (Figura 3c) que la temperatura del centro alcanza su valor asintótico recién después de aproximadamente 30 min. Asimismo, las soluciones analíticas de difusión pura consideran que la concentración de agua en la interfase se mantiene constante sin contemplar la resistencia a la transferencia de materia del lado del aire expresada a partir del coeficiente de transferencia de materia.

Los resultados obtenidos se compararon con el secado de pastas tradicionales formuladas con harina de trigo, bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura. Se observó que el tiempo de proceso de las pastas libres de gluten resultó un 50% inferior que en las pastas de harina de trigo.

Conclusiones

El tiempo experimental de secado necesario para que los fideos libres de gluten alcancen la humedad establecida (0.125g/g b.s., $a_w=0.65$) varió entre los 140 y 560 minutos (2.3-9.3 horas), siendo el proceso más largo la condición de baja temperatura y alta humedad relativa. Por el contrario, el tiempo de secado se redujo significativamente cuando se utilizó la condición de alta temperatura y baja humedad relativa. Estos valores son más cortos que los tiempos de fideos de trigo secados aproximadamente a 60°C (entre 14 y 20 horas), y similares a los tiempos de secado a más altas temperaturas (80-120°C), con 3 a 8 horas de proceso (Kill y Turnbull, 2001).

En este trabajo se modelaron adecuadamente las curvas de secado ajustando únicamente el coeficiente de difusión, cuyo valor promedio resultó de $3.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ similar al reportado por otros autores para pastas de trigo tradicionales (Mercier y col., 2013). El modelado matemático resulta una herramienta adecuada para predecir tiempos de proceso y analizar el efecto de parámetros como temperatura, velocidad y humedad del aire etc. en los tiempos de secado.

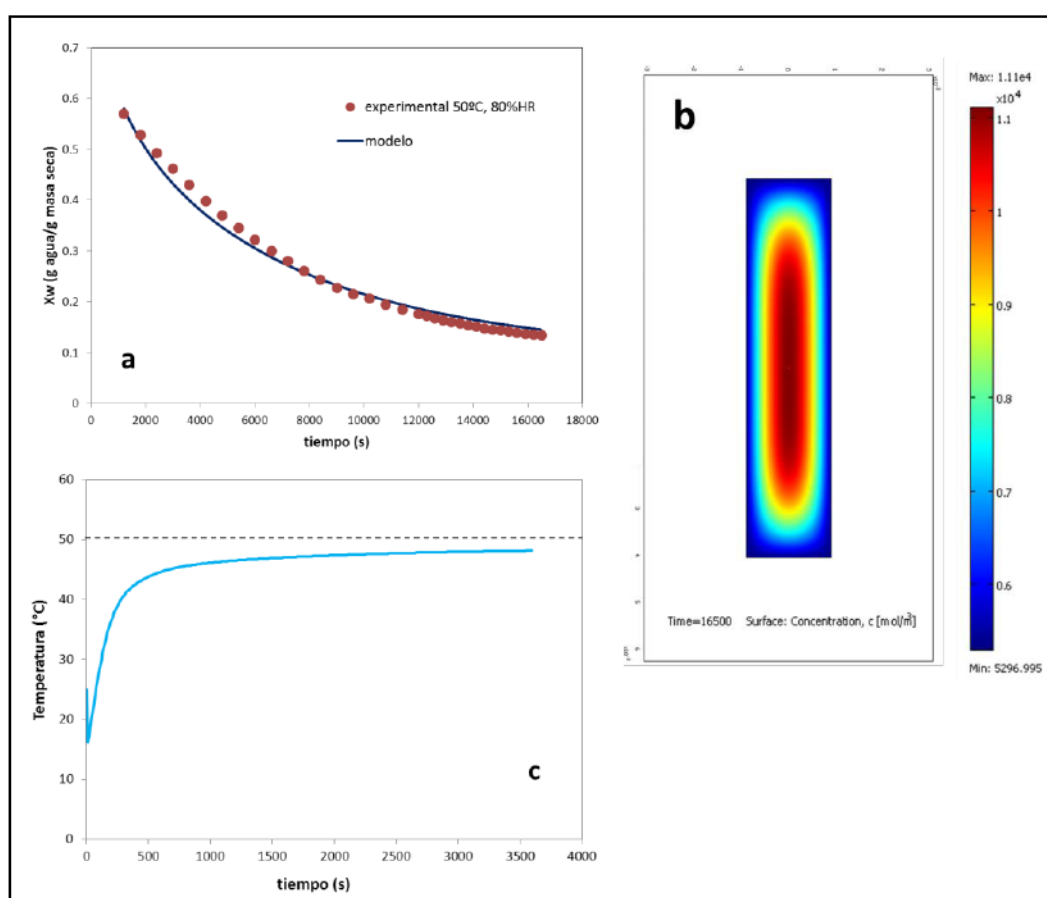


Figura 3. (a) Ajuste del modelo a los datos experimentales para las condiciones 50°C y 80% humedad del aire (Propiedades usadas: $k=0.48 \text{ W}/(\text{mK})$; $h=29.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; $k_m=2.95 \times 10^{-2} \text{ m/s}$; $C_b=5297 \text{ mol/m}^3$; $D=3.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$). (b) Distribución de la concentración de agua dentro de la pasta (mol/m^3) luego de 275 min de secado. (c) Historia térmica del centro de la pasta ($T_{\text{inicial}}=25^\circ\text{C}$, $T_\infty=50^\circ\text{C}$) durante los primeros 60 min de proceso.

Bibliografía

- De Temmerman, J., Verboven, P., Nicolai, B., & Ramon, H. (2007). *J. Food Eng.*, 80(3), 892-903.
- Geankoplis, C. (2003). *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*. Prentice Hall Press.
- Kill R.C y Turnbull K. (2001) *Pasta and Semolina Technology*, Oxford, Inglaterra.

- Larrosa, V., Lorenzo, G., Zaritzky, N., and Califano A. (2013). *J. Cereal Sc.*, 57, 520-526 (2013).
- Mercier, S., Moresoli, C. Villeneuve S., Mondor M. and Marcos B. (2013) *J. Food Eng.*, 118, 108–116 (2013).
- Migliori, M., Gabriele, D., de Cindio, B., & Pollini, C.M. (2005). *J. Food Eng.*, 69(4), 387-397.
- Saravacos, G. D., & Maroulis, Z. B. (2001). *Transport properties of foods*. CRC Press.
- Veladat, R., Zokaee Ashtiani, F., Rahmani, M., & Miri, T. (2012). *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, 7(2), 159-170.